تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس*

موسی محمودی صاحبی(۱)   میراحمد میرقاسمپور(۲)   محمد جواد نجاری(۳)

چکیده *خصوصیات دینامیکی سازه‌ها (فرکانس‌های طبیعی ارتعاش، شکل مودها و نسبت‌های میرایی)، نقش تعیین کننده‌ای در تبیین رفتار سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های لرزه‌ای دارند. در این تحقیق خصوصیات دینامیکی یک سازه سه طبقه (فرکانس‌های طبیعی ارتعاش و مقادیر نسبت‌های میرایی) به روش آزمایش ارتعاش آزاد مورد مطالعه قرار گرفت. این آزمایش با استفاده از اعمال یک جابجایی اولیه در سازه انجام شد و پاسخ آن توسط یک دستگاه جی‌پی‌اس اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل برای تعیین فرکانس‌های طبیعی با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس تطابق خوبی با نتایج حاصل از روش تحلیلی داشت. به عنوان مثال در یکی از آزمایش‌ها، فرکانس‌های طبیعی سازه در جهت x با استفاده از جی‌پی‌اس و روش تحلیلی، به ترتیب برابر ۱/۰۷ و ۰/۹۳ هرتز به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از جی‌پی‌اس روش خوبی برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی سازه است. در این تحقیق مقادیر به‌دست آمده برای نسبت‌های میرائی بسیار کم بوده است که می‌تواند ناشی از سختی و جرم پائین سازه مورد آزمایش باشد.*

واژه‌های کلیدی خصوصیات دینامیکی سازه‌ها؛ فرکانس طبیعی؛ زمان تناوب، نسبت میرایی؛ آزمایش ارتعاش آزاد؛ جی‌پی‌اس.

Determination of Structural Dynamic Characteristic Using GPS Device

M. Mahmoudi   M. A. Mirghasempour   M. J. Najari

Abstract *Structural dynamic parameters: natural period, shape modes and damping ratio of vibration, play a decisive role on the seismic behavior of those structures. There are several methods for determining of the structural dynamic parameters, such as: free vibration, ambient vibration and force vibration tests. In this research the structural response of a three-story building (the natural frequencies of vibration and the structural damping values) are monitored by a two-frequency GPS device mounted on the structure. The time in full oscillation of the structure will be the natural period of vibration. The damping ratio is determined using logarithmic formulation. The results from analytical method are the same as the experimental results approximately. For example, the natural period in X direction was determined 1.07 and 0.93 Hz using GPS and analytical methods. Comparing the results of the experiments and the results of the computer analysis shows the good accuracy in determining the parameters.*

Keywords Structural Dynamic Characteristics; Natural Period; Natural Frequency; Damping Ratio; GPS.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار دانشکده مهندسی عمران، گروه عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۲) عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، گروه نقشه‌برداری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۳) کارشناس ارشد مهندسی عمران- زلزله، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

خصوصیات دینامیکی سازه‌ها عبارتند از: زمان تناوب‌های طبیعی ارتعاش (فرکانس‌های طبیعی ارتعاش)، شکل‌مودهای ارتعاش و نسبت‌های میرایی. این خصوصیات نقش تعیین کننده‌ای در تبیین رفتار سازه‌ها در برابر زلزله دارند. تعیین میزان نیروهای وارد بر سازه‌ها با استفاده از طیف‌های طراحی از جمله موارد کاربرد خصوصیات مذکور می‌باشد[۱]. از کاربردهای دیگر این خصوصیات می‌توان به به‌روز کردن مدل اجزاء محدود، شناسایی و مکان‌یابی آسیب‌های احتمالی در سازه‌ها، بررسی طولانی مدت سلامت سازه‌ها و ارزیابی ایمنی سازه‌ها بعد از بارگذاری‌های شدید مانند زلزله اشاره کرد. هرچه مقادیر خصوصیات دینامیکی برای سازه‌ها دقیق‌تر تخمین زده شود، رفتار آن‌ها نیز دقیق‌تر ارزیابی می‌شود. با توجه به اهمیت مسئله زلزله در ایران، بررسی خصوصیات دینامیکی سازه‌ها، ارزیابی مقادیر آن‌ها و ارائه روش‌های ساده و دقیق برای تعیین آن‌ها یک ضرورت انکارناپذیر است.

در حال حاضر برای به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه‌ها، عمدتا از روابط تجربی و یا مدل‌های ریاضی و نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود که دارای تقریب قابل ملاحظه‌ای می‌باشند [۱]. خصوصیات دینامیکی سازه‌ها به عوامل بسیاری بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به جرم و سختی سازه، رفتار مصالح و ترکیب اعضای سازه اشاره نمود. تمام این عوامل را نمی‌توان در مدل‌های تحلیلی به‌طور دقیق دخالت داد. بنابراین همیشه بین مدل‌های تحلیلی و سازه واقعی اختلافاتی وجود دارد [۲]. انجام آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی سازه‌ها مطمئن‌ترین روش برای به‌دست آوردن مقادیر خصوصیات مذکور است.

روش‌های گوناگونی برای انجام آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی سازه‌های واقعی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های ارتعاش آزاد، ارتعاش محیطی و ارتعاش اجباری اشاره کرد. همچنین وسایل مختلفی برای ثبت ارتعاش سازه وجود دارد که عبارتند از شتاب‌سنج، سرعت‌سنج و تغییرمکان‌سنج. در آزمایش‌هائی که طی آن شتاب قابل ملاحظه‌ای در سازه به‌وجود می‌آید مثل ارتعاش اجباری، برای ثبت پاسخ سازه از دستگاه شتاب‌سنج استفاده می‌شود. برای آزمایش‌های ارتعاش آزاد و ارتعاش محیطی که در آن ارتعاش سازه در اثر ارتعاشات ضعیف به‌وجود می‌آید و شتاب وارده به سازه قابل توجه نیست، استفاده از شتابسنج برای ثبت پاسخ سازه مقدور نیست و باید از سرعت‌سنج یا تغییرمکان‌سنج استفاده نمود.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری تغییرمکان استاتیکی و دینامیکی، استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) است. سیستم موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning Systems)، یک سیستم راه‌بری و مسیریابی ماهواره‌ای است که از شبکه‌ای با ۳۲ ماهواره تشکیل شده است.

در ایران کارهایی توسط آقاکوچک و محمودی صاحبی [۱] برای تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها انجام شده است. آن‌ها بر روی یک ساختمان هفت طبقه فولادی، آزمایش‌های لرزه‌ای با روش ارتعاش اجباری انجام دادند و خصوصیات دینامیکی آن سازه را محاسبه نمودند. در این آزمایش به دلیل اعمال شتاب قابل ملاحظه از طرف دستگاه لرزاننده به سازه، برای ثبت پاسخ سازه از دستگاه شتاب‌سنج استفاده شد.

از جمله کارهای انجام شده در خصوص سنجش رفتار سازه به وسیله دستگاه GPS می‌توان به کارهای انجام شده زیر اشاره نمود.

پارک، سوهون، کیم و جی پارک در سال ۲۰۰۸ به مطالعه رفتار یک ساختمان ٦٦ طبقه پرداختند که در آن برای ثبت پاسخ سازه به طور هم زمان از سنجنده‌های لیزری، شتاب‌سنج و GPS استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده تطابق خوب اندازه‌گیری‌های GPS و سنجنده‌های شتاب‌سنج با یکدیگر بود. ولی مقایسه

نتایج حاصل از GPS و شتاب‌سنج با نتایج حاصل از سنجنده‌های لیزری نشان‌دهنده این موضوع بود که GPS و شتاب‌سنج، عملکرد بهتر و دقیق‌تری دارند [3].

لی و همکاران در سال ۲۰۰۶ مطالعه‌ای بر روی ساختمانی با سازه فولادی به ارتفاع ۱۰۸ متر در شهر توکیو انجام دادند و زمان تناوب‌های سازه را تحت اثر طوفان و زلزله با استفاده از گیرنده‌های GPS و شتاب-سنج به‌دست آوردند. نتایج مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌داد [4].

نیکوتوپولو، پروتوپسالتی و استایروس در سال ۲۰۰۶ [5]؛ به مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با GPS و شتاب‌سنج بر روی سازه‌های بلند پرداختند.

کازانیکا، پینتو ، فورلانی و آبروزی در سال ۲۰۰۵ [6]؛ در دانشگاه پلی تکنیک میلان و موسسه‌ی CESI (مرکز علوم الکترونیک تجربی ایتالیا) به شناسایی رفتار یکی از دودکش‌های بلند بتنی نیروگاه شهر پیاچنزا پرداختند و از نتایج تلفیق دو سیستم شتاب‌سنج و GPS در بهبود مدل نرم‌افزاری این سازه استفاده نمودند.

در سال ۲۰۱۱ مطالعه ای برای به‌دست آوردن فرکانس طبیعی یک پل عابر پیاده توسط موسچاس و استایوس به کمک دستگاه جی‌پی‌اس انجام شد [7].

انجام ارتعاش اجباری بسیار پرهزینه است و استفاده از آن در تعیین خصوصیات دینامیکی سازه‌ها مقرون به‌صرفه نیست. لذا برای صرفه‌جوئی اقتصادی باید از آزمایش‌های محیطی یا آزاد استفاده نمود که برای تحریک سازه نیاز به دستگاه‌های گرانقیمت ندارند. برای اندازه‌گیری پاسخ سازه در آزمایش‌های آزاد و محیطی نمی‌توان از شتاب‌سنج استفاده نمود و باید از سرعت‌سنج و یا تغییرمکان‌سنج استفاده نمود که دستگاه جی‌پی‌اس (به عنوان تغییرمکان سنج) مناسب‌ترین وسیله برای این منظور می‌باشد.

هدف از این تحقیق، تعیین زمان‌های تناوب و نسبت‌های میرایی یک ساختمان آزمایشگاهی به روش ارتعاش آزاد و با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس است. برای ارزیابی دقت اندازه‌گیری خصوصیات دینامیکی، نتایج مذکور با نتایج حاصل از تحلیل‌های کامپیوتری مقایسه می‌گردد.

روش‌های تعیین خصوصیات دینامیکی

همانگونه که در قسمت قبل اشاره شد، دو دسته روش برای تعیین مقادیر خصوصیات دینامیکی سازه‌ها وجود دارد:

روش تحلیلی یا مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار
روش آزمایشی

در ادامه به طور مختصر به هر یک از آنها اشاره می‌شود.

روش تحلیلی. با حل معادلات حرکت برای دستگاه-های چند درجه آزادی، می‌توان خصوصیات دینامیکی سازه‌ها (زمان‌های تناوب و شکل‌مودها) را تعیین نمود. معادلات حرکت ارتعاش آزاد برای یک دستگاه با N درجه آزادی، به صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود:

$$[\mathrm{M}]\{\ddot{u}\} + [\mathrm{K}]\{u\} = \{0\} \quad (۱)$$

که در آن [M] و [K] به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی با ابعاد $(\mathrm{N} \times \mathrm{N})$ و $\{\mathrm{u}\}$ و $\{\ddot{\mathrm{u}}\}$ به ترتیب، بردارهای تغییرمکان و شتاب با ابعاد $(\mathrm{N} \times 1)$ می‌باشند. تعیین ماتریس‌های جرم و سختی و همچنین حل تحلیلی مسئله فوق برای سازه‌های با درجات آزادی زیاد، به روش دستی بسیار وقت‌گیر و مشکل است. بنابراین برای سهولت در کار، از نرم‌افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود. با استفاده از مدل سازی کامپیوتری فقط می‌توان زمان‌های تناوب و شکل‌مودها را به دست آورد. ولی نمی‌توان مقادیر نسبت میرایی را محاسبه نمود.

روش‌های آزمایشی

آزمایش ارتعاش محیطی. در آزمایش ارتعاش محیطی از نیروهای طبیعی مانند بار باد و بارهای بهره‌برداری خود سیستم بعنوان نیروهای تحریک کننده استفاده می-

شود. به همین دلیل نتایج به‌دست آمده از این آزمایش در حقیقت نشان‌دهنده شرایط واقعی عملکرد سازه است. در ضمن به دلیل عدم نیاز به تجهیزات خاص برای تحریک سازه، بسیار کم هزینه است [۲]. در این روش برای پردازش داده‌ها از تبدیل سریع فوریه (FFT) استفاده می‌شود.

آزمایش ارتعاش‌آزاد. این آزمایش به دو صورت انجام می شود:

۱) اعمال تغییرمکان اولیه

۲) اعمال سرعت اولیه

در نوع اول، با کشیدن سازه به وسیله یک کابل و رها کردن ناگهانی آن در سازه ارتعاش ایجاد می‌شود. بعد از رها کردن سازه یک ارتعاش آزاد انجام می‌گیرد. در نوع دوم با اعمال نیروهای ضربه‌ای مثل انداختن یک وزنه سنگین و یا اعمال سرعت اولیه ارتعاش ایجاد می‌شود.

آزمایش ارتعاش‌اجباری. در روش آزمایش ارتعاش اجباری، سازه توسط یک محرک دینامیکی تحریک می‌شود. بهترین و دقیق‌ترین روش در اعمال نیرو، استفاده از نیروهای متناوب هارمونیک با فرکانس متغیر است[۱].

در هر کدام از آزمایش‌های ذکر شده از وسایل مختلفی برای ثبت پاسخ سازه استفاده می‌شود. در قسمت بعد به توضیح مختصری از هر یک از این وسایل پرداخته می‌شود و با توجه به اینکه در این پژوهش دستگاه GPS مورد استفاده قرارگرفته است، توضیح کامل‌تری در مورد آن ارایه می‌شود.

وسایل اندازه‌گیری در آزمایش‌ها

انواع لرزه نگارها. بخش اصلی لرزه‌نگارهای امروزی، لرزه‌سنج‌ها هستند که انرژی امواج ورودی را به ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌کنند. این دستگاه‌ها به صورت مبدل (گیرنده، آشکار کننده) امواج لرزه‌ای را به الکتریکی تبدیل کرده و جابجایی، سرعت و یا شتاب حرکت زمین را ثبت می‌کنند. هر لرزه‌سنج معمولا در جهتی قرار داده می‌شود که یکی از مولفه‌های (شرقی- غربی، شمالی- جنوبی و یا عمودی) از حرکت سازه را بسنجد.

شتاب‌سنج .شتاب‌سنج دستگاهی است که مقدار شتاب جسم را نسبت به جسم در حال سقوط آزاد اندازه‌گیری می‌کند. انواع مختلف این وسیله عبارت است از: شتاب-سنج مکانیکی، شتاب‌سنج الکترواستاتیکی، شتاب‌سنج پیزورزیستور، شتاب‌سنج پیزوالکتریکی و شتاب‌سنج-های خازنی. این شتاب‌سنج‌ها دارای کاربردهای فراوان در علوم می‌باشند که یک نمونه از آن استفاده در صنعت ساختمان است.

سرعت‌سنج. از دیگر لرزه‌نگارهای ثبت ارتعاشات، سرعت‌سنج است که ارتعاشات سازه را به سرعت تبدیل کرده و ثبت می‌کند. از این وسیله علاوه بر ثبت ارتعاش، برای کالیبره کردن شتاب‌سنج‌ها نیز استفاده می‌شود.

تغییرمکان‌سنج. تغییرمکان‌سنج یکی دیگر از وسایل ثبت ارتعاشات است که به وسیله آن می‌توان به نمودار جابجایی-زمان رسید. از جمله این وسایل می‌توان به سنجنده‌های لیزری و دستگاه جی‌پی‌اس اشاره کرد.

جی‌پی‌اس (GPS). دستگاه جی‌پی‌اس موقعیت مکانی مطلق نقاط را تعیین می‌کند. بنابراین یک تغییرمکان‌سنج محسوب می‌شود. با وجود این که در ابتدا GPS برای هدف‌های نظامی و ناوبری طراحی شده بود ولی امروزه در بسیاری از علوم مختلف ازجمله: تحلیل سازه‌ها، راه-سازی، محیط زیست، ترافیک و حمل و نقل، زمین-

شناسی، شهرسازی و ... کاربرد فراوانی یافته است. علاوه بر ایجاد تحول در علوم نقشه‌برداری و تعیین موقعیت هر نقطه از زمین، دستگاه‌های GPS اکنون به یکی از مهم‌ترین ابزارهای مهندسی عمران برای بررسی تغییرات روی سازه‌ها و پیش‌بینی خطرهای احتمالی در طول عمر آن‌ها تبدیل شده اند.

بعضی از کاربردهای این سیستم عبارت است از:

- کنترل جابه‌جایی ساختمان‌ها و برج‌های بلند.
- بررسی جابه‌جایی پاشنه‌های سدها در دراز مدت.
- بررسی اثر نیروی باد بر سازه‌های بلند.
- نظارت بر وضعیت بهره‌برداری پل‌ها جهت اندازه‌گیری شکست، جابه‌جایی و تغییرشکل آن‌ها.
- کنترل ماهواره های سنجش از راه دور
- بررسی تغییر شکل پوسته‌ی زمین
- بررسی اثر زلزله بر ساختمان‌های بلند
- استفاده در اجرای تونل‌های یک طرفه و دو طرفه
- استفاده در ساخت بزرگراه‌ها و جاده‌ها

با توجه به سرعت برداشت داده های GPS می‌توان از این دستگاه‌ها برای نگهداری در سازه‌های نیمه صلب با دوره تناوب بالا ازجمله ساختمان‌های بلند و پل‌ها نیز بهره برد. اخیرا دستگاه‌های GPS تولید شده دارای سرعت برداشت ۲۰ تا ۵۰ هرتز می‌باشند که از آن‌ها می‌توان برای مانیتور کردن سازه‌های صلب نیز استفاده کرد.

دستگاه GPS موقعیت مکانی را از طریق فرایندی به نام ترفیع فضایی تعیین می‌کند. این تعیین موقعیت می‌تواند دو یا سه بعدی باشد. در حالت سه بعدی حداقل ٤ ماهواره برای تعیین موقعیت نیاز است و با توجه به مبحث سرشکنی(Adjustment) خطاها درصورتی که گیرنده GPS در هر لحظه با بیش از ٤ ماهواره در ارتباط باشد و نیز هندسه قرارگیری ماهواره-ها مناسب باشد، دقت تعیین موقعیت بالاتر می‌رود.

تعیین موقعیت با GPS به دوصورت مطلق و نسبی صورت می‌گیرد و مشاهدات GPS به دو شکل استاتیک و کینماتیک انجام می‌شود. استاتیک به انجام مشاهدات در یک موقعیت ثابت دلالت می‌نماید در حالیکه منظور از کینماتیک، انجام مشاهدات در حرکت است. مشاهدات کینماتیک خود به دو صورت PPK (Post Processed Kinematic) و RTK (Real Time Kinematic) انجام می‌شود. از آنجائیکه در این تحقیق هدف به دست آوردن زمان تناوب و نسبت میرایی سازه‌ها می‌باشد، لذا باید از طریق مشاهدات به روش PPK و تعیین موقعیت نسبی دو نقطه با GPS، نمودار جابجایی- زمان را پیدا کرد. در جدول (۱) دقت مشاهدات GPS ارائه شده است.

جدول ۱ دقت‌های عمودی و افقی دستگاه GPS

Positioning	Horizontal Accuracy (RMS)	Vertical Accuracy (RMS)
RTK	1 cm + 1 ppm	2 cm + 1 ppm
Static	5 mm + 0.5 ppm	5 mm + 1 ppm

از جمله مزایای GPS در مقایسه با شتاب‌سنج، دسترسی آسان و کارکردن راحت با این دستگاه می-باشد. همچنین برای استفاده از شتاب‌سنج‌ها نیاز به برانگیخته شدن سازه با شتابی قابل درک برای آن‌ها است. در سازه‌های بلند مرتبه که تحت اثر باد به حرکت در می‌آیند، شتاب لازم برای تحریک سنسورهای شتاب‌سنج به‌وجود نمی‌آید ولی چون GPS جابجایی نقاط را ثبت می‌کند این مشکل برای آن مطرح نیست[3]. از جمله معایب این دستگاه می‌توان به عدم درک جابجایی‌های کوچکتر از یک میلی‌متر اشاره کرد [8-10].

وسایل جنبی در انجام آزمایش. از دیگر وسایلی که همراه با GPS در آزمایشگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند، گیرنده‌های GPS به همراه آنتن هستند که در این تحقیق

از گیرنده‌های شرکت Trimble مدل 5800 با سرعت برداشت ۱۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). همچنین سه پایه، صفحه فلزی و ترابلاک از دیگر وسایل جنبی دستگاه جی‌پی‌اس هستند.



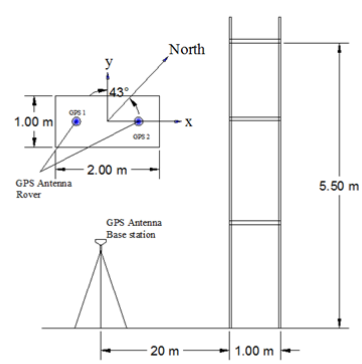
شکل ۱ تصویر گیرنده GPS 5700

مدل سازه‌ای مورد آزمایش

سازه‌ای که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت، یک قاب خمشی فولادی به ابعاد ۲ متر طول، ۱ متر عرض و ۵/۵ متر ارتفاع است که در سه سقف اجرا شده است (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲ شمای کلی سازه مورد آزمایش



شکل ۳ شمای کلی سازه و موقعیت گیرنده‌های GPS

در این مدل فرضیات زیر درنظر گرفته شده است:

الف - سقف‌ها کاملا صلب می‌باشند.
ب - اتصالات به صورت کاملا گیردار هستند.

مشخصات تیر و ستون سازه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات مقاطع اعضای سازه

Element	Column (mm)	Beam (mm)
Dimension	40 × 40 × 2	50 × 30 × 2

روش انجام آزمایش‌ها. در این قسمت مراحل مختلف انجام آزمایش تشریح می‌گردد.

مرحله اول. گیرنده اصلی در فاصله حدودا ۲۰ متر از سازه نصب می‌شود و در حالت کینماتیک و با سرعت برداشت ۱۰ هرتز برای ثبت ارتعاشات قرار می‌گیرد (شکل‌های ۳ و ٤).

مرحله دوم. گیرنده آنتن روور به همراه یک عدد کنترلر بر روی سازه نصب می‌گردد. تنظیمات این گیرنده در حالت کینماتیک قرار می‌گیرد (شکل ۳).

مرحله سوم. سازه به وسیله یک طناب در جهت دلخواه کشیده شده و رها می‌گردد. در تمام این حالات دستگاه روور در حال مشاهده داده‌های ماهواره‌ای قرار می‌گیرد.

این عمل برای دو جهت x وy محلی سازه تکرار می‌گردد. در هر جهت میزان کشیدگی به دفعات مختلف و با مقدار جابجایی‌های اولیه متفاوت صورت می‌گیرد. جابجایی اولیه به وسیله‌ی طناب به سقف سوم سازه در وسط اضلاع اعمال می‌گردد.

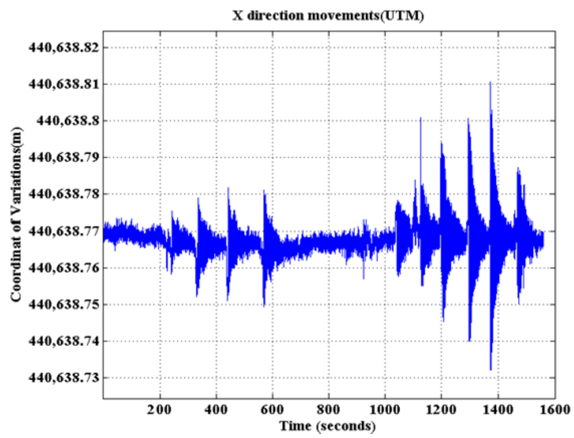
مرحله چهار. داده‌های مشاهده شده از دستگاه‌های GPS تخلیه شده و مورد پردازش قرار می‌گیرد.



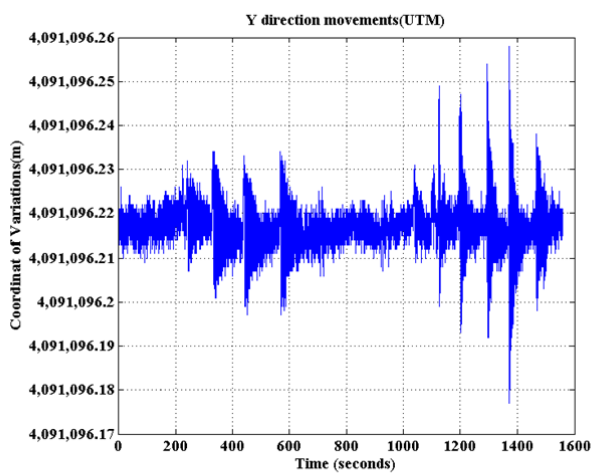
شکل ٤ تصویر گیرنده‌ی ایستگاه Base

نتایج آزمایش‌ها

پس از به‌دست‌آوردن داده‌های خام از GPS و پردازش اطلاعات با استفاده از نرم‌افزار متلب (MATLAB) نمودارهای (۵) حاصل شد. این نمودارها جابجایی بام سازه را در زمانی حدود ۱٦۰۰ ثانیه که با نرخ برداشت یک‌دهم ثانیه انجام پذیرفته است را نشان می‌دهد. این مدت زمان مربوط به چندین آزمایش می‌باشد. در (۵) تغییرات مختصات سازه بر حسب زمان در هر دو راستای X و Y در سیستم مختصات که از مشاهدات GPS حاصل شده است مشاهده می‌گردد. محور قائم جابه‌جائی و محور افقی زمان می‌باشد.

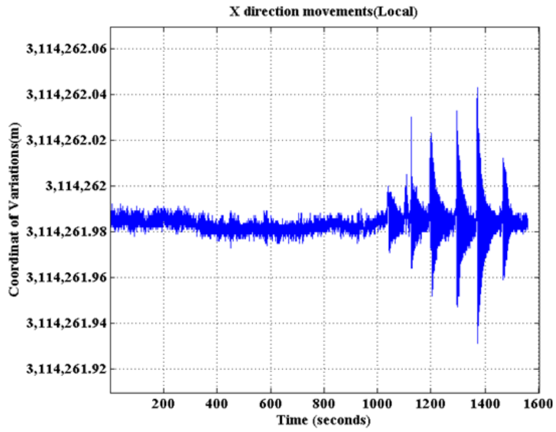


الف- در جهت X

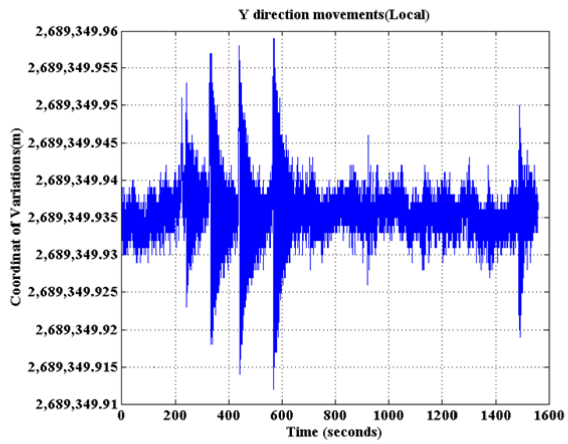


ب- در جهت Y

شکل ۵ نمودار تغییرات مختصات - زمان سازه در دو جهت X و Y



شکل ٦ تغییرات مختصات -زمان سازه در جهت X در سیستم مختصات محلی سازه



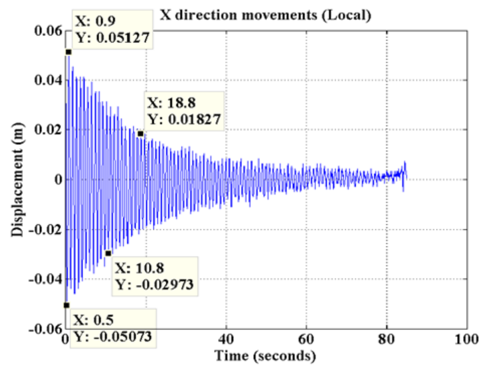
شکل ۷ تغییرات مختصات -زمان سازه در جهت Y در سیستم مختصات محلی سازه

نمودارهای (۵) مختصات دستگاه GPSی که بر روی بام سازه نصب شده است را در سیستم مختصات جهانی UTM بر حسب زمان نمایش می‌دهد. باتوجه به اینکه محور سازه با شمال جغرافیایی محل نصب دارای زاویه‌ی $43^{\circ}02'27''$ بود شکل (۳)، با استفاده از ماتریس دوران، مختصات UTM به مختصات محلی سازه تبدیل شد (رابطه‌ی ۲).

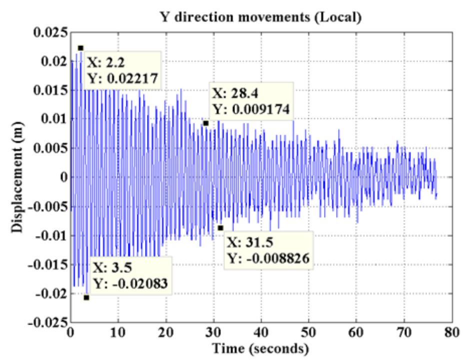
$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{۲}$$

بنابراین نمودارهای شکل (۵) که بیانگر تغییرات مختصات-زمان سازه به ترتیب در دو راستای X و Y، در سیستم مختصات محلی سازه هستند، حاصل می‌گردد.

برای هر جهت چندین بار آزمایش انجام شد. در هر بار یک تغییرمکان جدید به سازه اعمال شد تا تاثیر جابه‌جائی اولیه بر نتایج آزمایش بررسی شود. در مدت زمان اعمال جابجایی‌های مختلف به سازه، GPS به طور پیوسته در حال ثبت موقعیت جابجایی‌های سازه بود. به همین علت در شکل (٦و۷) و چندین پرش در نمودار مشاهده می‌شود که بعد از یک مدت زمان میرا شده و دوباره همین روند تکرار می‌گردد. در حقیقت شکل‌های فوق نتیجه چند آزمایش را به‌طور همزمان نشان می‌دهد.



شکل ۸ جابجایی مرکز جرم بام در جهت X در سیستم مختصات محلی با تغییرمکان اولیه ۵ سانتی‌متر



شکل ۹ جابجایی مرکز جرم بام در جهت Y در سیستم مختصات محلی با تغییرمکان اولیه ۲/۵ سانتی‌متر

به این سازه در راستای X، شش جابجایی و در راستای Y، چهار جابجایی اعمال شد.

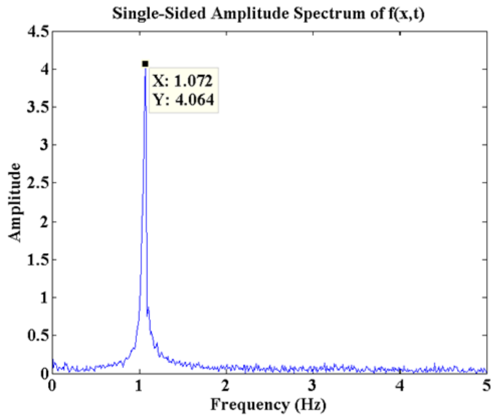
با استفاده از نمودارهای کلی نوسان سازه (شکل‌های ٦ و ٧)، و برای هر کدام از مقادیر اولیه جابجایی، در هر راستا، نمودار نوسانی جداگانه ترسیم شد. شکل (۸ و۹) نمودارهای نوسانی را برای جابه‌جائی ۵ و ۲/۵ سانتی‌متر به ترتیب برای جهت‌های X و Y نشان می‌دهد.

مقادیر فرکانس‌های طبیعی. برای هر یک از نمودار های نوسانی، با استفاده از نرم افزار متلب (MATLAB) و تبدیل سریع فوریه (FFT) که از انواع تبدیل‌های گسسته می‌باشد- طیف فوریه نمودار جابجایی-زمان سازه ترسیم گردید. به کمک منحنی تبدیل فوریه، فرکانس غالب برای هر کدام از نمودارها به دست آمد.

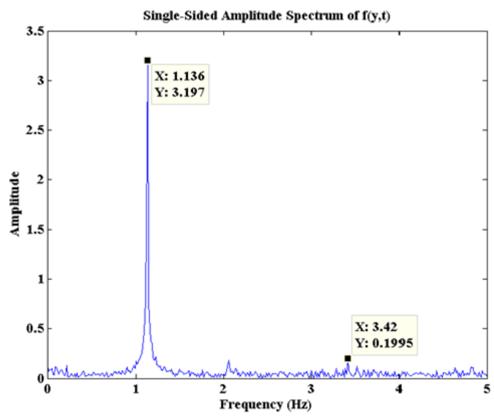
شکل (۹) در راستای Y می‌باشد. نمودارهای جابجایی در حوزه‌ی زمان و نمودار طیف فوریه در حوزه‌ی فرکانس ترسیم می‌شوند.

به کمک نمودارهای شکل (۱۰و۱۱) و همچنین سایر نمودارهای موجود در این تحقیق که به دلیل جلوگیری از طولانی شدن بحث ارائه نشده است، یک فرکانس غالب سازه مشاهده می‌شود که همان فرکانس طبیعی سازه در مود اول است. ولی فرکانس مود دوم سازه به شکل روشن قابل مشاهده نیست.

چون در هر راستا چندین بار آزمایش تکرار شد، لذا فرکانس سازه در هر راستا چندین بار اندازه‌گیری شد. در جدول (۳) میانگین این اندازه‌گیری‌ها در دو جهت عمود بر هم نشان داده شده است.



شکل ۱۰ طیف گسسته‌ی فوریه برای نمودار شکل ۸



شکل ۱۱ طیف گسسته‌ی فوریه برای نمودار

جدول ۳ مقادیر فرکانس طبیعی سازه در دو جهت X و Y

مقادیر میانگین فرکانس (هرتز)	مود اول	مود دوم
در راستای X	۱/۰۸۰	۳/۲۳۳
در راستای Y	۱/۱۳٦	۳/۳۱۳

مقدار ضریب پراکندگی برای نتایج به‌دست آمـده در جدول (٤) ارائه شده است.

جدول ٤ ضرایب پراکندگی نتایج

ضریب پراکندگی	مود اول	مود دوم
C_{vx}	۰/۰۰۸	۰/۰۲٤
C_{vy}	۰/۰۰٤	۰/۰٤۱

لازم به توضیح است که در هر ارتعاش آزاد، سازه در تمام مودهای ارتعاشی نوسان می‌کند ولـی بـه دلیـل اینکه تغییرمکان اولیه‌ای که بـه سـازه داده شـده اسـت، شبیه به مود اول نوسان می‌باشد، لذا شکل ارتعاش سازه بسیار شبیه به مود اول خواهد بـود هـر چنـد مودهـای دیگر نیز به صورت ضعیف در ارتعاش خواهند بود. بـه همین دلیل فرکانس مود اول به صورت قابل ملاحظه‌ای از دیگر فرکانس‌ها متمایز است.

محاسبه‌ی نسبت‌های میرایی سازه. ارتعاش آزاد دستگاه‌های دینامیکی در صورت عدم وجود میرائی، تا بی‌نهایت ادامه دارد ولی تجربه نشان می‌دهد که

ارتعاش‌آزاد در همه دستگاه‌ها به تدریج مستهلک می-شود [10]. این موضوع به دلیل وجود خاصیت میرائی در سازه‌ها است. میرایی در یک سیستم ساختمانی ناشی از لقی اتصالات، استهلاک داخلی در مصالح و غیره به‌وجود می‌آید. خاصیت میرائی سازه‌ها با دو پارامتر ضریب میرائی و نسبت میرائی تعریف می‌شود. نسبت میرائی، در حقیقت نسبت ضریب میرائی یک سیستم به ضریب میرائی بحرانی است (رابطه ۳).

$$\xi = \frac{C}{C_{cr}} \tag{۳}$$

میرایی یک سیستم را نمی توان به روش تحلیلی تعیین نمود لذا باید در آزمایشگاه اندازه‌گیری شود. به کمک نتایج حاصل از ثبت ارتعاش آزاد، به دو روش می‌توان نسبت میرایی را تعیین کرد:

الف) روش تنزل لگاریتمی

ب) روش نیم‌دامنه

در این تحقیق از هر دو روش برای تعیین نسبت میرائی سیستم استفاده شده است.

روش تنزل لگاریتمی. در روش تنزل لگاریتمی، نسبت میرائی از رابطه ٤ تعیین می‌شود که اثبات آن در مرجع [۱۱] ارائه شده است.

$$\ln\frac{u_P}{u_Q} = \frac{2m\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \tag{٤}$$

که در آن u_P و u_Q دامنه‌های قرائت شده به فاصله‌ی m دوره از یکدیگر هستند (شکل ۸ و۹). وقتی که ξ کوچک باشد ($\xi < 0.2$)، آنگاه $\sqrt{1-\xi^2} \approx 1$. بنابراین:

$$\ln\frac{u_P}{u_Q} = 2m\pi\xi \tag{۵}$$

روش نیم‌دامنه. برای محاسبه نسبت میرائی در این روش، بر روی نمودارهای ارتعاشی سازه، دو نقطه P و R به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که:

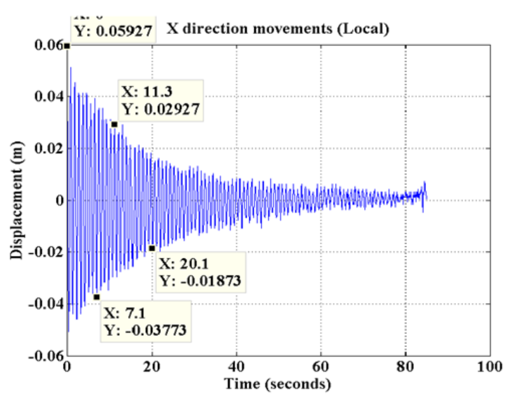
$$u_R = \frac{u_P}{2} \tag{٦}$$

اگر این دو نقطه به اندازه N دوره تناوب از یکدیگر فاصله داشته باشند (شکل (۱۲و ۱۳) آنگاه نسبت میرائی سیستم از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

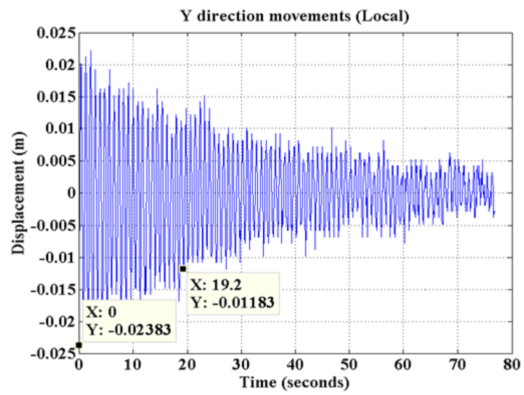
$$\xi = \frac{0{,}11}{N} \tag{۷}$$

اثبات این رابطه در مرجع [۱۱] ارائه شده است. با این روش، می‌توان به‌سادگی برای دستگاه‌های دارای ξ اندک، مقدار نسبت میرایی را به‌دست آورد.

با توجه به اینکه در هر یک از دو راستای X و Y محلی سازه چند بار آزمایش انجام شد لذا با استفاده از نمودارهای حاصل از آن‌ها و به کمک دو روش تنزل لگاریتمی و نیم‌دامنه، مقادیر نسبت میرایی سازه محاسبه گردید.



شکل ۱۲ جابجایی مرکز جرم بام در جهت X در سیستم مختصات محلی با تغییرمکان اولیه ٤/٥ سانتی‌متر



شکل ۱۳ جابجایی مرکز جرم بام در جهت Y در سیستم مختصات محلی با تغییرمکان اولیه ۲ سانتی‌متر

جدول ۵ مقادیر نسسبت میرایی سازه

میانگین نسبت میرایی سازه	X	Y
روش نیم‌دامنه	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۵۱
روش تنزل لگاریتمی	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۴۸

از جدول (۵) مشاهده می‌گردد که مقادیر نسبت میرائی برای هر دو جهت بسیار کوچک است و با مقادیر مورد انتظار برای ساختمان‌های واقعی (۰/۰۵) اختلاف دارد. این موضوع را میتوان به‌صورت زیر تفسیر نمود:

میرائی هر سیستم سازه‌ای شدیدا متاثر از جرم و سختی سازه، نوع اتصالات و همچنین خصوصیات میانقاب‌ها است. در این مدل سازه‌ای جرم و سختی در مقایسه با سازه‌های واقعی بسیار کم است. همچنین میانقاب در این سیستم وجود ندارد. ضمن اینکه نوع اتصالات مدل با ساختمان‌های واقعی تفاوت دارد. لذا کوچک بودن نسبت میرایی در این سازه معقول به‌نظر می‌رسد. بدیهی است اگر بخواهیم نسبت میرائی را برای ساختمان‌های واقعی به‌دست آوریم باید این آزمایش را برای آن‌ها انجام دهیم.

هر مودی از سازه دارای یک نسبت میرائی مخصوص به خود می‌باشد [۱]. از آنجائیکه مود غالب در این آزمایش‌ها مود اول بوده است لذا انتظار می‌رود نسبت میرائی به‌دست آمده مربوط به مود اول سازه باشد.

نتایج حل تحلیلی

قبل از انجام آزمایش، تحلیل اولیه برای پیش بینی رفتار سازه صورت گرفت و فرکانس‌های طبیعی سازه به روش تحلیلی تعیین شد. دو روش تحلیلی برای محاسبه‌ی فرکانس‌های سازه مورد استفاده قرار گرفت:

– روش دستی
– روش نرم‌افزاری

روش دستی. در این روش، معادله حرکت در رابطه‌ی ۱ به صورت دستی حل شد و فرکانس‌های مربوط به مودهای اول، دوم و سوم سازه با استفاده از حل دستگاه تعیین شد. برای حل ساده‌تر رابطه‌ی ۱ فرضیاتی به شرح ذیل اعمال شد:

الف– مرکز جرم بر مرکز سختی منطبق است.
ب– از تغییرمکان محوری اعضا صرفنظر می‌شود.
پ– دیافراگم کف‌ها صلب فرض می‌شود.

ت– سختی سازه در دوجهت متعامد سازه یکسان فرض می‌شود.

در جدول (٦) فرکانس‌های به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود.

جدول ٦ مقادیر فرکانس طبیعی سازه به روش تحلیلی دستی

راستا	مود اول	مود دوم	مود سوم
در راستای X	۱/۰۱۸	۲/۷۸۱	۳/۸۲۰
در راستای Y	۱/۰۱۸	۲/۷۸۱	۳/۸۲۰

روش نرم‌افزاری. در این تحقیق برای تعیین فرکانس‌های طبیعی سازه از نرم‌افزار تحلیل سازه‌ی ETABS-9.7 نیز استفاده شد. این نرم افزار بر پایه روش‌های المان محدود به حل مسئله می‌پردازد. در این مدل‌سازی سقف به صورت یک دال دوطرفه‌ی صلب مدل شد و بار هر کدام از دیافراگم‌ها به مقدار ۳۲۰ کیلوگرم مشخص شد. این جرم به صورت متمرکز در طبقات لحاظ شد. مقاطع تیر و ستون به نرم‌افزار داده شد و تمام اتصالات از نوع گیردار فرض گردید.

نرم افزار تعداد ۹ زمان تناوب را تعیین نمود. سه شکل‌مود در راستای X، سه شکل‌مود در راستای Y و سه شکل‌مود در جهت پیچشی مشخص شد (جدول ۷).

جدول ۷ مقادیر فرکانس طبیعی سازه به روش تحلیلی کامپیوتری

فرکانس سازه	مود اول	مود دوم	مود سوم
در راستای X	۰/۹۳۲	۳/۰۱۹	٤/۹۷۸
در راستای Y	۱/۰۸۳	۳/۳۰٤	٥/۰٥۱
پیچشی	۱/۱۸۹	۳/٥٦۱	٥/۳٦٥

مقایسه نتایج حاصل از دو روش تحلیلی نشان می‌دهد که نتایج دارای دقت قابل قبول می‌باشد.

نتیجه‌گیری

خصوصیات دینامیکی سازه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های مختلف دارند. تعیین مقادیر دقیق آن‌ها می‌تواند دقت طراحی لرزه‌ای را افزایش دهد. در این تحقیق فرکانس‌های طبیعی (عکس زمان تناوب) یک سازه مدل به دو روش (آزمایشی و تحلیلی) تعیین و با هم مقایسه شد. همچنین نسبت‌های میرایی سازه نیز به کمک دو روش تنزل لگاریتمی و نیم‌دامنه تعیین گردید.

فرکانس‌های طبیعی این سازه در جهت x با استفاده از روش آزمایشی (جی‌پی‌اس) و تحلیلی به ترتیب برابر ۱/۰۸ و ۰/۹۳ هرتز به‌دست آمد. همچنین مقادیر مربوطه در جهت y به کمک این دو روش به ترتیب برابر ۱/۱۳٦ و ۱/۰۸۳ هرتز حاصل شد. نسبت‌های میرایی نیز با دو روش تنزل لگاریتمی و نیم‌دامنه به ترتیب برابر ۰/۰۰۸٦ و ۰/۰۰٥۰ تعیین شد. با مقایسه مقادیر فوق نتایج زیر حاصل می‌گردد:

نتایج حاصل برای تعیین فرکانس‌های طبیعی با استفاده از دستگاه جی‌پی‌اس تطابق خوبی با نتایج حاصل از روش تحلیلی دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت استفاده از جی‌پی‌اس روش خوبی برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی سازه است.

– اندک تفاوتی که در مقایسه نتایج مشاهده می‌گردد، بخاطر این است که در روش تحلیلی، شبیه‌سازی رفتار سازه با واقعیت، تطابق کامل ندارد.

– با توجه به مقادیر پائین نسبت‌های میرائی می‌توان نتیجه گرفت این نسبت شدیدا به سختی و جرم سازه بستگی دارد که در این سازه مقادیر کوچکی را دارا بودند.

– پیشنهاد می‌شود با توجه به استفاده روز افزون از دستگاه جی‌پی‌اس در سازه‌های جدید برای کنترل رفتار سازه، تعیین خصوصیات دینامیکی این سازه‌ها نیز مد نظر قرار گیرد.

مراجع

۱. آقا کوچک، ع.، محمودی صاحبی، م.، "، *بررسی خصوصیات دینامیکی ساختمان های چند طبقه با استفاده از روش آزمایش ارتعاش اجباری*" ، فصلنامه مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر، سال هشتم، شماره ۳۱.

۲. یادگاری، ج.، بهار ا.؛ "شناسایی پارامترهای مودال بر اساس داده های آزمایش ارتعاش محیطی با نرم افزار *جدید*SIP"، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشکده فنی، دوره ٤٤، شماره ۱، صفحه ۱۲۱ تا ۱۳۰، (۱۳۸۹).

3. Park, H., Sohn, H., Kim, I., & Park, J., "Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings", *Struct. Design Tall Spec*. Build., vol. 17, pp. 117-132, (2008).

4. Li, X., Ge, L., Ambikairajah, E., Rizos, C., Tamura, Y. & Yoshida, A., "Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system", *GPS Solut*, vol. 10, pp. 233–247, (2006).

5. Nickitopoulou, A., Protopsalti, K. & Stiros, S., "Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises", Engineering Structures, vol. 28, pp. 1471–1482, (2006).

6. Cazzaniga, N., Pinto, L., Gianfranco, F., and Abruzzi, P., "Monitoring Oscillations of Slender Structures with GPS and Accelerometers", FIG Working Week 2005 and GSDI-8 Cairo, Egypt, pp. 16-21, (2005).

7. Moschas, F. & Stiros S., "Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer", *Engineering Structures*, vol. 33, pp.10–17, (2011).

8. Psimoulis, P., Pytharouli, S., Karambalis, D. & Stiros S., "Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures", *Journal of Sound and Vibration,* vol. 318, pp. 606–623, (2008).

9. Ting, Y., Hong, L. & Ming G., "Effect of different construction materials on propagation of GPS monitoring signals*", Journal of Measurement*, vol. 45, pp.1126–1139, (2012).

10. DANA, PH., "Global Positioning System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Applications", *Journal of Real-Time systems*, vol. 12, pp. 9-40, (1997).